

УДК 004.89

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШУМУ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

**Ю. С. Шевченко**

Молодший науковий співробітник  
Кафедра безпеки життєдіяльності  
Національний авіаційний університет  
Інститут екологічної безпеки  
пр. Космонавта Комарова, 1,  
м. Київ, Україна, 03058  
E-mail: shevchenko24.12@gmail.com

*Запропоновано математичну модель оцінювання рівнів шуму, створюваного транспортними потоками на території сучасних міст з урахуванням динаміки руху автомобілів в потоці на ділянці автомобільного шляху. Проведено експериментальну верифікацію розробленої моделі на автомобільних шляхах міст України для різних типів транспортних засобів, інтенсивності транспортних потоків та швидкості руху потоку*

**Ключові слова:** шумове забруднення, автомобільний транспорт, макроскопічне моделювання, акустична потужність, транспортні потоки

*Предложена математическая модель оценивания уровней шума, создаваемого транспортными потоками на территории современных городов с учетом динамики движения автомобилей в потоке на участке автомобильного пути. Проведена экспериментальная верификация разработанной модели на дорогах городов Украины для разных типов транспортных средств, интенсивности транспортных потоков, а также скорости движения потока*

**Ключевые слова:** шумовое загрязнение, автомобильный транспорт, макроскопическое моделирование, акустическая мощность, транспортные потоки

## 1. Вступ

Шум – один із основних факторів негативного впливу на населення великих міст. Постійний цілодобовий вплив шуму підвищує нервову напругу, знижує творчу діяльність, якість праці та відпочинку.

Вважається, що майже 20 % населення Європейського економічного союзу (близько 80 млн. людей) страждають від впливу шуму, рівень якого перевищує 65 дБА, що розглядається, як неприпустимий. Додатково 7 млн. громадян проживає у так званих «сірих зонах» (рівню шуму знаходяться між 55 і 65 дБА), у яких шум завдає суттєвих неприємностей протягом доби [1, 2].

Зниження шуму до допустимих рівнів – є екологічною, соціальною та економічною проблемою розвитку сучасних міст. Для реалізації поставленої задачі повинна бути доступна та детальна інформація про стан шумового режиму досліджуваної території.

Тому актуальними слід вважати дослідження транспортних потоків, особливо автомобільного транспорту, що присвячені оцінюванню та запобіганню проблем заторів на автомобільних дорогах, що безпосередньо пов'язано з формуванням звукових полів вздовж автомобільних доріг та всередині жилих мікрорайонів.

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка задачі

На сьогодні інженерні моделі, що використовуються на практиці, можуть визначати еквівалентні рівні шуму від транспортних потоків на прямих дорогах на основі емпіричних залежностей рівня шуму від швидкості руху [3] та відсотку важких транспортних засобів в потоці [4], а також розраховувати спектральні залежності потужності транспортних засобів від швидкості

та інтенсивності потоку [5], що дає точніші результати та враховувати додаткові фактори впливу.

В той же час макроскопічне моделювання транспортних потоків вже давно описано в науковій літературі [6]. Оцінювання залежностей руху автомобілів в потоці на основі макроскопічного підходу дозволило отримати моделі залежності швидкість-щільність-потік, серед яких добре відомі моделі Гріншілда, Грінберга, Андервуда та Едді [6].

Проте результати такого моделювання використовувалися для розрахунку лише для статистичних даних руху автомобільного транспорту в сучасних містах [6]. На даний момент чітко прослідковується необхідність врахування макроскопічних характеристик руху транспортного потоку при акустичному моделюванні.

Найближчим підходом є робота Кана [7], в якій приводиться три моделі оцінювання шуму транспорту – статичний розрахунок на основі середніх швидкостей і швидкостей потоку, статичний розрахунок на основі середніх кінематичних залежностей та повна динамічна модель оцінки шуму, що враховує розповсюдження транспортних засобів в мережі.

Проте навіть в приведених підходах не представлена комплексна модель, що дозволила би оцінити не тільки окремі складові, такі як рівні шуму створювані окремим автомобілем, потоком, а також ефекти зниження шуму при його поширенні (характерні для міського середовища [8, 9]) та сумарну оцінку рівнів звукового тиску в точці приймача.

## 3. Цілі та задачі дослідження

Метою даної роботи є розробка моделі шуму від рухомого потоку транспортних засобів з урахуванням

залежностей розподілу окремих автомобілів на лінії джерела шуму.

Задачами дослідження, вирішення яких необхідно для досягнення цієї мети є:

– дослідження таких етапів моделювання рівнів шуму від транспортних потоків, як акустичне моделювання потужності транспортних засобів;

– макроскопічне моделювання динаміки руху автомобілів в потоці та інтегрування рівнів шуму в точці приймача.

Для переходу від моделювання окремого транспортного засобу до моделювання потоку використано чисельне інтегрування окремих точкових джерел в лінійне джерело шуму.

#### 4. Розробка математичної моделі шуму транспортних потоків як лінійного некогерентного джерела шуму

##### 4.1. Постановка задачі моделювання шуму транспортних потоків

Припускається, що транспортний потік – лінійне джерело шуму – складається з окремих транспортних засобів – точкових джерел шуму, які в свою чергу визначаються окремими джерелами шуму (наприклад, шумом взаємодії колеса з дорогою, шумом двигуна), що розташовані на різних висотах над поверхнею дороги, що також є точковими джерелами шуму. Окремі точкові джерела є некогерентними джерелами шуму.

Для моделювання поширення звуку звукове поле автомобіля представляється у рамках припущень геометричної акустики у вигляді променевої картини. В даній роботі розглядалося лише однорідне середовище. Припускається також, що точка спостереження знаходиться в дальньому звуковому полі джерела.

Таким чином, окремі транспортні засоби рухаються вздовж горизонтального сегменту лінії шуму (дороги) на висоті  $h_s$  над прямим сегментом дороги на горизонтальній поверхні землі.

На рис. 1. показана геометрія взаємного розташування лінійного джерела шуму та приймача в горизонтальній площині  $xz$ . Розглядається випадок, коли висота джерела шуму  $h_s$  дорівнює висоті приймача шуму  $h_R$ .

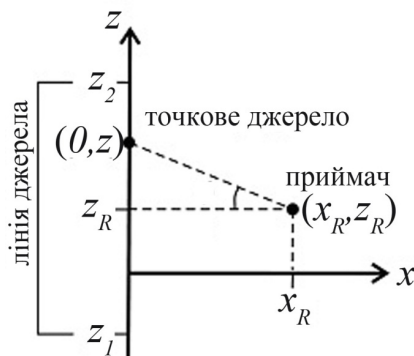


Рис. 1. Геометрія з положенням точкового джерела  $(0, z)$  на лінії джерела на осі  $z$  між точками  $(0, z_1)$  та  $(0, z_2)$ , та положенням приймача  $(x_R, z_R)$

Лінійне джерело шуму розташовано на осі  $z$  між точками  $(0, z_1)$  та  $(0, z_2)$ . Точкове джерело шуму розта-

шоване в точці  $(0, z)$ . Приймач розташований в точці  $(x_R, z_R)$ .

##### 4.2. Математична модель шуму транспортних потоків

Розглянемо точкове джерело шуму, що рухається з постійною швидкістю  $v$  вздовж осі  $z$  від  $z=z_1$  до  $z=z_2$  (рис. 1). Положення джерела як функція від часу  $t$  визначається як  $z(t)=z_1+vt$ . Час руху тоді дорівнює  $T=(z_2-z_1)/v$ .

Еквівалентний рівень шуму

$$L_{\text{Aeq}} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L} dt \right)$$

при зміні змінної інтегрування від часу  $T$  до відстані  $z$  запишеться як:

$$L_{\text{Aeq}} = 10 \log \left( \frac{1}{z_2 - z_1} \int_{z_1}^{z_2} 10^{0.1L} dz \right), \quad (1)$$

де  $L=L(x, y, z)$  – рівень звукового тиску в точці прийому.

В загальному випадку рухається потік з багатьма транспортними засобами по лінійному сегменту дороги від  $z=z_1$  до  $z=z_2$  (рис. 1). Середня кількість транспортних засобів на одиницю довжини визначається як  $Q/v$ , де  $Q$  – кількість транспортних засобів за одиницю часу. Середня кількість транспортних засобів для лінійного сегменту дороги від  $z=z_1$  до  $z=z_2$  таким чином становить  $(z_2 - z_1)Q/v$ .

Враховуючи характеристики руху автомобілів в потоці рівняння (1) за пишемо наступним чином:

$$L_{\text{Aeq}} = 10 \log \left( \int_{z_1}^{z_2} 10^{0.1L} dz \right) + 10 \log \left( \frac{Q}{v} \right). \quad (2)$$

Рівняння (2) представляє рівномірний розподіл некогерентних точкових джерел по сегменту лінії від  $z=z_1$  до  $z=z_2$ . Будемо називати такий розподіл некогерентним лінійним джерелом.

Дана модель є справедливою, коли густина автомобілів на сегменті лінійного джерела шуму, швидкість руху потоку та інтенсивність руху транспортних засобів є постійними. Проте в реальних умовах міського середовища ці характеристик потоку змінюються в залежності від таких факторів як час доби, формування заторів, наближення до світлофорів. Тому доцільно розглядати ці характеристик не як постійні величини, а як змінювані взаємозалежні параметри. Для вирішення цієї задачі при моделювання шуму транспортних потоків були використані принципи макроскопічного моделювання.

Було запропоновано розглядати кількість транспортних засобів на одиницю довжини сегменту лінійного джерела шуму не як середній показник для даної ділянки автомобільного шляху, а як функціональну залежність від таких параметрів, як швидкість транспортного потоку для виділеної ділянки, а також годинну кількість автомобілів в потоці.

При макроскопічному моделюванні ділянка автомобільного шляху умовно була розділена на сегменти дороги. На основі [2, 6, 7] були отримані взаємозалежності для основних параметрів моделювання.

Таким чином, результати макроскопічного моделювання дозволили переписати середню кількість

транспортних засобів на одиницю довжини  $Q/v$ , як функціональну залежність  $\rho(z,t) = \frac{Q(z,t)}{v(z,t)}$ .

Проінтегрувавши за часом отримаємо:

$$\rho(z) = \frac{1}{T} \int_0^T \rho(z,t) dt. \quad (3)$$

Тому рівняння (2) з використанням рівняння (3) можна записати як:

$$L_{Aeq} = 10 \log \left( \int_{z_1}^{z_2} 10^{0.1L} dz \right) + 10 \log(\rho(z)). \quad (4)$$

Таким чином, для чисельного розрахунку рівню шуму  $L_{Aeq}$  використовується рівняння (4). Дискретне представлення рівняння (4), що використовується в роботі для розрахунків має наступний вигляд:

$$L_{eq} = 10 \log \left( \sum_j 10^{0.1L} \delta z_j \right) + 10 \log(\rho(z)), \quad (5)$$

де індекс  $j$  змінюється від  $z=z_1$  до  $z=z_2$  через невеликий суміжний інтервал  $\delta z_j$  (рис. 2).

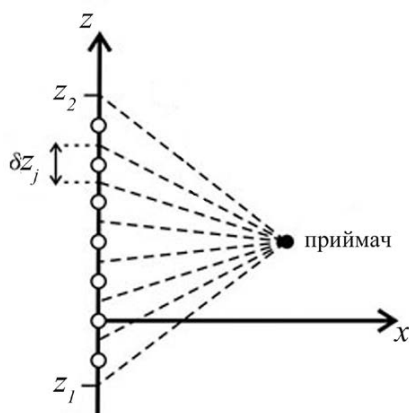


Рис. 2. Сегментування лінії джерела шуму по осі  $z$  між  $z=z_1$  та  $z=z_2$  з точковими джерелами шуму в центрах сегментів:  $\delta z_j$  – довжина сегменту

Рівень звукового тиску в точці прийому  $L(x, y, z)$  розраховувався як різниця рівня звукової потужності окремого джерела шуму та сумарного зниження шуму, що включає такі ефекти як дивергенцію звуку, відбиття від поверхні землі, ефекти дифракції звукових хвиль на кромках акустичних екранів, поглинання шуму в повітрі та відбиття від вертикальних перешкод, таких як наприклад фасади будівель для 1/3 октавного діапазону частот.

Для розрахунку потужності окремого джерела шуму (автомобіля) використовувалася методика *Harmonoise* [5] з модифікацією її алгоритмів розрахунків рівнів шуму для експлуатаційних умов України [10].

#### 4.3. Верифікація математичної моделі шуму транспортних потоків

Для верифікації розробленої моделі шуму транспортних потоків було проведено ряд експерименталь-

них досліджень, які дозволили оцінити її точність та визначити межі застосування.

Верифікація проводилася для кожного етапу моделювання акустичних та макроскопічних характеристик окремих автомобілів та транспортних потоків.

Для визначення меж застосування моделі вимірювання шуму проводилися в різних містах України, на різних дорожніх покриттях та для транспортних потоків різної інтенсивності. Вимірювання акустичних характеристик проїздів окремих автомобілів та руху автомобілів в потоці проводилися згідно вимог ГОСТ 20444-85 [11].

##### 4.3.1. Експериментальних досліджень характеристик шуму окремого транспортного засобу

Вимірювання рівнів шуму окремих транспортних засобів різних категорій проводилось для одиночних автомобілів. Відстань заміру проїзду окремого автомобіля  $l_0$  змінювалася від 20–50 м для легкових транспортних засобів та до 60–80 м для важких автомобілів.

Вимірювання проводилися на дорожньому покритті типу щільний асфальтобетон (м. Київ) та з врахуванням поправки для дорожнього покриття типу бруківка для сильно пошкоджених дорожніх покриттів (м. Бурштин).

Всі дослідження проводилися для прямолінійної ділянки дорожнього шляху, без поворотів та світлофорів (прискорення  $a=0$  м/с<sup>2</sup>) та куту нахилу дороги  $\alpha_{road}=0^\circ$ .

На рис. 3 приведені спектри виміряних рівнів шуму для автомобілів I категорії (рис. 3, а) та III категорії (рис. 3, б). Отримані залежності показують, що створюваний шум є широкосмуговим непостійним рівнем шуму з основним вкладом в області низьких частот. Пікові рівні шуму для легкових автомобілів спостерігаються для смуг частот 800–1000 Гц, що чітко виражено для швидкостей 40–70 км/год. На відміну від автомобілів I категорії для автомобілів II та III категорій не спостерігається піків в області середніх частот. Рівні шуму монотонно спадають при збільшенні частоти звуку.

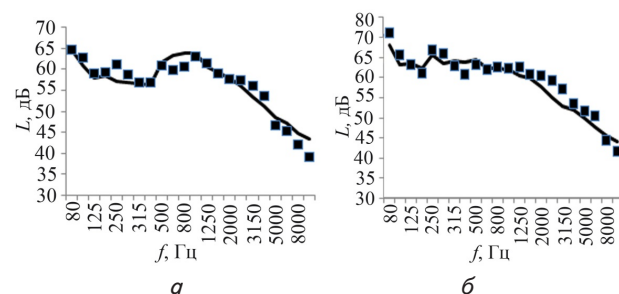


Рис. 3. Зіставлення результатів експериментальних досліджень проїздів окремого автомобіля з розрахованим рівнем звукового тиску в точці вимірювання, де суцільна крива – теоретичне моделювання, точки – результати експериментальних досліджень: а – легковий автомобіль I-ої категорії,  $v=60$  км/год., м. Київ; б – важкий транспортний засіб III-ої категорії,  $v=55$  км/год., м. Бурштин

За результатами проведених досліджень встановлено, що розрахунок потужності легкових автомобілів дає більшу достовірність при  $v \geq 40$  км/год. В табл. 1

розрахована абсолютна похибка моделювання по відношенню до експериментальних досліджень для сумарного еквівалентного рівня шуму в дБА. Значення абсолютної похибки зменшується при збільшенні швидкості легкового автомобіля.

Таблиця 1

Залежності  $L_{Aeq}$  від швидкості руху легкового транспортного засобу та абсолютна похибка моделювання  $E$  сумарного еквівалентного рівня шуму

Категорія транспортних засобів	$v$ , км/год.	$L_{Aeq}$ , дБА		$E$ , дБА
		Експеримент	Моделювання	
I	20	57,5	58,8	1,3
	30	54,3	58,9	4,6
	40	66,8	62,8	4,1
	50	69,6	69,3	<1,5
	60	70,3	70,6	<1,5
	70	74,5	73,9	<1,5
II	55	74,4	74,0	<1,5
III	50	78,5	77,7	<1,5

Для важких транспортних засобів відхилення менші, ніж для відповідних швидкостей легкових автомобілів. Це пов'язано з тим, що проїзди важких транспортних засобів на відповідних швидкостях створюють вищі рівні шуму (відповідно і перевищення над фоновим рівнем шуму >10 дБ у всьому діапазоні частот), тому результати моделювання важких транспортних засобів дають більшу точність та повторюваність.

#### 4. 3. 2. Апробація макроскопічних залежностей розробленої моделі шуму транспортних потоків

Для дослідження було обрано ділянку автомобільного шляху на Чоколовському бульварі м. Києва довжиною 500 м. Дана ділянка була розбита на сегменти по 50 м кожний.

Проводилася відеозйомка руху транспортних засобів на кожному досліджуваному сегменті, яка далі оброблялася для отримання бази даних залежностей інтенсивності руху транспортних засобів на кожному сегменті від часу, густини потоку на кожному сегменті та швидкості. Початок досліджуваної ділянки знаходився у межах руху вільного потоку, а далі кожен сегмент наближався до світлофора. Таким чином, це дало змогу проаналізувати змінювані макроскопічні характеристики при зміні руху від вільного потоку до повної зупинки на світлофорі (також може інтерпретуватися як умови затору на дорозі). Швидкість вільного потоку становила 65 км/год. та падала до 0 км/год. при зупинці при очікуванні на світлофорі. Максимальна густина потоку на сегменті руху становила 8 авт./од. довжини сегменту.

Дослідження проводилися для трьох смуг в руху в одному напрямку. Результати порівняння експериментальних досліджень та математичного моделювання приведені на рис. 4 для трьох смуг руху.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що крива залежності швидкості потоку від густини є монотонно спадаючою. Як бачимо з резуль-

татів важливою характеристикою є швидкість зростання густини потоку на досліджуваній ділянці. Так для I смуги (рис. 4, а), де швидкість зростання густини є невеликою та значні показники густини спостерігаються лише на останніх сегментах ділянки перед світлофором залежність краще описується лінійною моделлю. Тоді як для II (рис. 4, б) та III (рис. 4, в) смуг, де швидкість зростання густини значно вища та значні показники 2–3 авт./од. довжин спостерігаються вже з 4–5 сегменту ділянки залежність краще описується експоненційною моделлю. Точність моделювання знижується при наближенні до сегменту, де розташований світлофор, що визначається як сегмент з високою густиною потоку 4–5 авт./од. довжини та невеликими швидкостями 20–30 км/год.

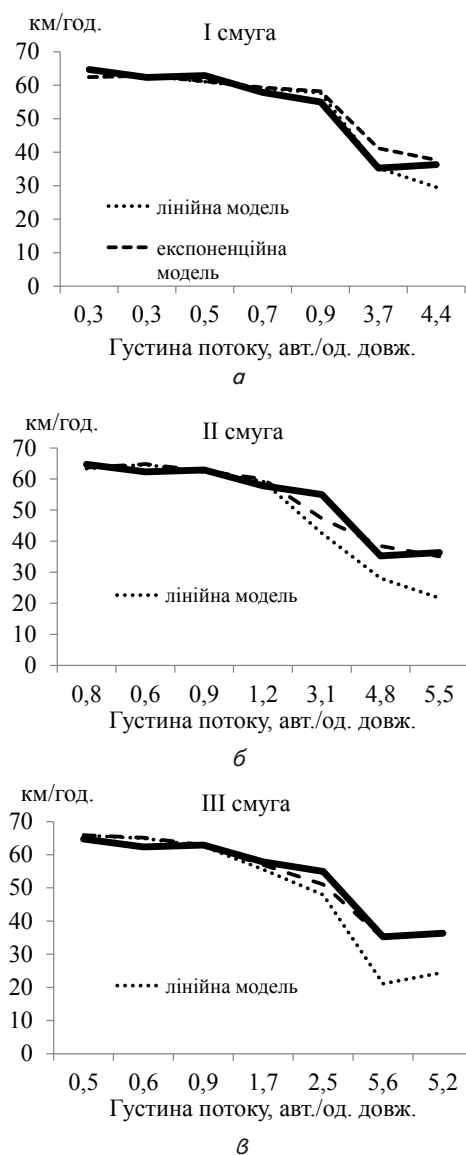


Рис. 4. Макроскопічні залежності швидкості руху від густини потоку: а – перша смуга, б – друга смуга, в – третя смуга руху

Тому макроскопічні залежності слід використовувати в математичній моделі шуму транспортних потоків з урахуванням характеристик таких потоків.



#### 4.3.3. Апробація розробленої математичної моделі шуму транспортних потоків

Для визначення еквівалентних рівнів шуму транспортних потоків кожен замір тривав 15 хв. Отримані результати перераховувалися для еквівалентних рівнів шуму створюваних відповідними транспортними потоками за одну годину. Аналіз проведений в області низьких та середніх частот, так як саме їх вклад є переважаючим.

Аналіз результатів (табл. 2) показав, що для невеликих транспортних потоків дана модель дає похибку більше 5 дБА.

**Абсолютна похибка моделювання еквівалентного рівня шуму від транспортних потоків з відповідним кількісним складом автомобілів в потоці**

Місце проведення дослідження	Тип потоку	Склад потоку (I, II та III категорії відповідно)	L <sub>Аeq</sub> , дБА		Е, дБА
			Експеримент	Моделювання	
м. Бурштин	Невеликий потік	(61,2,1)	64,0	69,2	5,1
м. Київ	Середній потік	(461,14,3)	71,4	68,9	2,5
м. Київ	Значний потік	(1094,30,15)	78,8	79,9	<1,5

Такі результати можна пояснити кількістю подій проїздів автомобілів: чим вона вища – тим вища точність моделювання, тому для інтенсивних транспортних потоків похибка моделювання нижча.

Таким чином, розроблена математична модель дає точніші результати в умовах інтенсивних транспорт-

них потоків. При моделюванні невеликих транспортних потоків (менше 400 авт./год.) в розроблену математичну модель слід вводити поправки, що враховують склад та інтенсивність потоку.

#### 5. Висновки

Розроблено модель шуму транспортних потоків на основі принципів макроскопічного моделювання, що дозволила врахувати такі змінювані характеристики, як швидкість, густина та інтенсивність руху автомобільного транспорту в потоці.

Проведена експериментальна верифікація запропонованої моделі на автомобільних шляхах міст України. Показано, що дана модель дає достовірні результати для швидкостей транспортних засобів 40–70 км/год. та потоків більше 400 авт./год.

Отримано залежності швидкості руху транспортного потоку від густини автомобілів на ділянці автомобільного шляху для різних смуг руху на прикладі ділянки Чокотівського бульвару м. Києва.

Різні смуги дороги також можуть бути представлені некогерентними лінійними джерелами. Шум автомобільного та рейкового транспорту можна моделювати як шум лінійного некогерентного джерела шуму. Якщо один автомобіль або потяг необхідно представити більше, ніж одним джерелом (наприклад, щоб задати шум взаємодії шин з покриттям дороги та шум двигуна окремо), кожне точкове джерело відповідає некогерентному джерелу.

#### Література

- Дідковський, В. С. Основи акустичної екології [Текст] / В. С. Дідковський, В. Я. Акименко, О. І. Запорожець та ін. – Кіровоград: Імпекс ЛТД, 2001. – 520 с.
- Kang, J. Urban Sound Environment [Text] / Jian Kang. – London: Taylor & Francis, 2006. – 304 p.
- Delany, M. E. The prediction of noise levels L10 due to road traffic [Text] / M. E. Delany, D. G. Harland, R. A. Hood, W. E. Scholes // Journal of Sound and Vibration. – 1976. – Vol. 48, Issue 3. – P. 305–325. doi:10.1016/0022-460x(76)90057-2
- Calixto, A. The statistical modeling of road traffic noise in an urban setting [Text] / A. Calixto, F. B. Diniz, P. H.T. Zannin // Cities. – 2003. – Vol. 20, Issue 1. – P. 23–29. doi:10.1016/s0264-2751(02)00093-8
- HAR32TR-040922-DGMR20 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning [Text] / written by Renee Nota, Robert Barelds, Dirk van Maercke, agreed by Hans van Leeuwen. – Harmonoise WP 3, Technical Report, 2005. – 96 p.
- Ahmed, Abdel-Rahim Intelligent Transportation Systems [Text] / Ahmed Abdel-Rahim. – Rijeka: InTech, 2012. – 214 p.
- Can, A. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidence [Text] / A. Can, L. Leclercq, J. Lelong, J. Defrance // Applied Acoustics. – 2009. – Vol. 70, Issue 6. – P. 821–829. doi:10.1016/j.apacoust.2008.09.020
- Шевченко, Ю. С. Аналіз формул розрахунку ефективності акустичних екранів на вулицях [Текст] / Ю. С. Шевченко // Вісник НАУ. – 2010. – № 4 (45). – С. 94–99.
- Шевченко, Ю. С. Моделювання впливу фасаду будівлі на формування звукового поля [Текст] / Ю. С. Шевченко, О. М. Береговий, В. Г. Парацанов // Вісник НАУ. – 2012. – № 1 (50). – С. 242–247.
- Шевченко, Ю. С. Метод картографування шуму від транспортних потоків у сучасному місті [Текст] / Ю. С. Шевченко // Вісник НАУ. – 2012. – № 4 (53). – С. 242–247.
- ГОСТ 20444-85. Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/20/20016.shtml>